

Carolina Yumi Nozawa Kokubun

**ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS PARA A DIMINUIÇÃO DO PLÁSTICO
CONVENCIONAL EM EMBALAGENS FLEXÍVEIS ALIMENTÍCIAS**

Sorocaba/ SP

2023

Carolina Yumi Nozawa Kokubun

**ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS PARA A DIMINUIÇÃO DO PLÁSTICO
CONVENCIONAL EM EMBALAGENS FLEXÍVEIS ALIMENTÍCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

Sorocaba/ SP

2023

K79a

Kokubun, Carolina Yumi Nozawa

Alternativas sustentáveis para a diminuição do plástico convencional em embalagens flexíveis alimentícias / Carolina Yumi Nozawa Kokubun. -- Sorocaba, 2023

38 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Sandro Donnini Mancini

1. Sustentabilidade. 2. Alimentos - Embalagens. 3. Plásticos biodegradáveis.

I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Carolina Yumi Nozawa Kokubun

ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS PARA A DIMINUIÇÃO DO PLÁSTICO
CONVENCIONAL EM EMBALAGENS FLEXÍVEIS ALIMENTÍCIAS

Sorocaba, 19 de janeiro de 2024

Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini
Orientador

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em
reunião de 17 de janeiro de 2024

Sorocaba/SP
2024

AGRADECIMENTOS

À minha família por sempre apoiar e incentivar os meus estudos, aos meus avós Kaola Kokubun, Tomiji Kokubun, Yukiko Sarashina e Hiroshi Nozawa que atravessando os mares são a minha inspiração de coragem para sempre seguir em frente. Às minhas tias Sonia Nozawa e Sandra Nozawa por terem sido um de meus exemplos de força como mulheres acadêmicas. Especialmente aos meus pais, Monica Nozawa e Armando Kokubun que sempre batalharam e não mediram esforços para que eu entrasse em uma universidade pública, sem vocês nada disso seria possível.

À minha segunda família sorocabana Pega no Mel: Beatriz Marina, Beatriz Hanada, Bianca Themoteo, Camila Naomi, Clorys Castro, Danielle Javaro, Felipe Coelho Gabriela Balieiro, Shirlei Araújo e Sthefani Nagissa. Vocês que foram as minhas âncoras nos melhores e piores momentos dessa vida universitária e que me ensinaram o verdadeiro significado de amizade.

Ao Vitor, meu companheiro, que me acompanha há mais de 5 anos nessa jornada sempre me incentivando. Obrigada por sempre estar ao meu lado, crescendo comigo, me aconselhando e sendo meu confidente.

A todos os funcionários da Unesp Sorocaba; servidores técnicos, assistentes administrativos, a assistente social, docentes, funcionários da limpeza, cantina e segurança, pela manutenção diária do nosso campus e pelo cuidado e carinho com os alunos. Em especial ao Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini pela orientação e apoio durante este trabalho. Às suas aulas ministradas no início da graduação, na disciplina de Materiais e Reciclagem que despertaram meu interesse no tema desse trabalho.

RESUMO

As embalagens surgiram por uma necessidade humana de transportar itens, e com o tempo foram se adaptando conforme as necessidades humanas até a atualidade, em que atuam por exemplo no armazenamento dos bens de consumo. Embalagens flexíveis possuem a característica de adequar a sua forma conforme o produto em seu interior, e no caso de embalagens flexíveis alimentícias o material mais utilizado é o plástico convencional, caracterizado por não ser biodegradável e oriundo de fonte fóssil. Visto as problemáticas ambientais do uso de plásticos convencionais em embalagens flexíveis, este presente trabalho analisou por uma revisão bibliográfica alternativas com enfoque em materiais sustentáveis que possam substituir os polímeros não renováveis e não biodegradáveis; e formas de minimizar os impactos quando ainda forem utilizados plásticos convencionais.

Palavras-chave: alternativas ao plástico convencional; embalagens flexíveis alimentícias sustentáveis; biopolímeros; biodegradação; reciclagem.

ABSTRACT

Packaging emerged due to a human need to transport items, and over time they have adapted according to human needs, until today, where they operate, for example, in the storage of consumer goods. Flexible packaging has the characteristic of adjusting its shape according to the product inside, and in the case of flexible food packaging, the most commonly used material is conventional plastic, characterized by being non-biodegradable and derived from fossil sources. Given the environmental issues associated with the use of conventional plastics in flexible packaging, this present study examined, through a literature review, alternatives focusing on sustainable materials that can replace non-renewable and non-biodegradable polymers, as well as ways to minimize impacts when conventional plastics are still used.

Keywords: alternatives to conventional plastic; sustainable flexible food packaging; biopolymers; biodegradation; recycling.

LISTA DE SIGLAS

ACCV	Análise do Custo do Ciclo de Vida
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BOPP	Polipropileno biorientado
EVA	Acetato de Vinila
EVOH	Copolímero de Etileno e Álcool Vinílico
GEE	Gases de efeito estufa
MEG	Monoetilenoglicol
PA	Poliamida
PBAT	Poli(butileno adipato co-tereftalato)
PBS	Polibutileno succinato
PCL	Policaprolactona
PCR	"Post consumer recyled" - reciclado pós consumo
PEBLD	Polietileno linear de baixa densidade
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Politereftalato de etileno
PHA	Polihidroxialcanoatos
PHB	Polihidroxibutirato
PHBV	3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato
PLA	Poliácido láctico
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTA	Poliácido terfálico
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
PVOH	Álcool polivinílico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO	11
3	METODOLOGIA	12
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
4.1	Plásticos.....	13
4.2	Embalagem	14
4.3	Características essenciais da embalagem flexível alimentícia	15
4.3.1	<i>Propriedades de barreira</i>	15
4.3.2	<i>Propriedades mecânicas</i>	16
4.4	Sustentabilidade.....	17
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
5.1	Biopolímeros <i>drop-in</i>	22
5.1.1	<i>Bio-PP</i>	22
5.1.2	<i>Bio-PET</i>	23
5.1.3	<i>Bio-PE</i>	23
5.2	Biopolímeros renováveis e biodegradáveis.....	24
5.2.1	<i>Amido</i>	24
5.2.2	<i>PLA</i>	25
5.2.3	<i>PHA (Polihidroxialcanoatos)</i>	26
5.2.4	<i>Celulose</i>	27
5.3	Biopolímero de origem fóssil e biodegradável – PBAT	28
5.4	PCR.....	29
5.5	Alternativas sustentáveis combinadas com plástico convencional	30
6	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros grupos humanos eram nômades e dependentes da disponibilidade sazonal de vegetais e da migração de animais. Esse contexto não favorecia o acúmulo de bens além daquilo que podia ser carregado nas costas de cada um, o que limitava a disponibilidade de recursos. Dessa forma surgiu a necessidade de transportar e armazenar itens, surgindo assim as primeiras estruturas as quais atualmente denominamos de embalagens. Elas eram provavelmente feitas do embrulho de folhas, peles de animais e argilas moldadas. A invenção do soprador de vidro pelos romanos em torno de 50 a.C permitiu a disseminação do vidro como recipiente e os barris feitos de madeira também serviram como embalagens. Os chineses foram os responsáveis pela criação dos primeiros papéis por volta de 100 a.C, para pintura, que foram espalhados pela Europa e posteriormente passaram também a ser utilizado em embalagens. Até então as embalagens eram simples, embalagens a granel e barris eram o suficiente para o cotidiano das pessoas, e não eram planejadas como um projeto de engenharia. A partir da revolução industrial o contexto e as relações globais mudaram; os bens de consumo passaram a se tornar mais disponíveis devido a maior produção e os centros urbanos expandiram. O campo ainda era o responsável pela produção alimentar, e com uma maior demanda e produção passou a ser necessário realizar o transporte e o armazenamento dos bens de consumo, e assim as embalagens começaram a ser utilizadas em maior escala e exercer cada vez mais funções importantes. Com o tempo foram surgindo marcas que vendiam os produtos e, as embalagens foram vistas como uma forma de também identificar a companhia que as vendiam, com isso algumas marcas que existem até hoje surgiram como; Colgate, Schweppes e Perrier. Logo, além de serem atribuídas ao condicionamento e transporte, as embalagens passaram a ter a função de informar sobre o produto vendido, assim como vendê-lo (Institute of Packaging Professionals, 2013).

As embalagens acompanham os costumes da sociedade, ou seja, refletem a cultura, as demandas, os materiais disponíveis e a tecnologia de uma comunidade. Logo temas latentes atuais refletem na indústria de embalagens, tais como; preocupação ambiental refletindo na escolha de materiais mais sustentáveis e o acesso a informações sobre todo o processo de fabricação do produto indicado em alguns itens por meio dos QR-Codes. Atualmente a facilitação do acesso aos bens de

consumo, muito devido ao próprio uso das embalagens, elevou os níveis de consumo resultando na maior produção de embalagens (Institute of Packaging Professionals, 2013).

No ano de 2022, de todas as embalagens fabricadas no Brasil os plásticos apresentaram 33.6% do valor bruto da produção, seguido pelo papelão ondulado com participação de 19.6% (ABRE, 2022). Ao todo nesse ano foram produzidas 2.167 mil toneladas de embalagens plásticas flexíveis, que são aquelas que aderem ao formato do produto em seu interior. Os principais polímeros consumidos no Brasil em 2022 foram o polipropileno (PP) com 20,3%, o polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) com 16,1% e o polietileno de alta densidade (PEAD) com 13,8%. Seguidos deles foi o polietileno de alta densidade (PEAD), os plásticos reciclados, policloreto de vinila (PVC), polietileno de baixa densidade (PEBD), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET). (ABIEF, 2022). Esses são alguns dos plásticos mais utilizados em embalagens flexíveis, e que junto com o acetato de vinila (EVA), poliamida (PA) e poliuretano (PU) são chamados de plásticos convencionais e que geralmente são de origem não renovável (petróleo) e não são degradáveis. Para o mesmo ano, o setor de alimentos foi o segundo maior consumidor de plástico, sendo responsável por 21,9% do consumo, perdendo apenas para a construção civil que consumiu 25,4%. Ademais esse setor é caracterizado por ter uma alta rotatividade ou um ciclo de vida curto, ou seja, os seus produtos são de uso único e descartados após o consumo do alimento em um período menor que 1 ano, gerando um acúmulo de resíduos. (Abiplast, 2022)

O plástico é comumente utilizado como filme flexível, por ser moldável e barato ao considerar produções em larga escala (atendendo as altas demandas de consumo). Mas apesar dessas vantagens, quando descartado no meio ambiente, não se decompõe, podendo se fragmentar e ficar presente na forma de microplásticos (Beaumont *et al.*, 2019).

Conforme já comentado, geralmente o processo de fabricação dos plásticos convencionais utiliza fontes não renováveis como o petróleo, o qual é refinado por craqueamento e extraído a nafta, processo que, entre outros impactos ambientais, emite gases do efeito estufa (GEE), que contribuem para o aquecimento global. A produção de plástico emite anualmente no mundo aproximadamente 400 milhões de toneladas de CO₂, custando por ano ao menos U\$13 bilhões devido aos seus danos de poluição ambiental que tem como consequências a acidificação dos oceanos e a

sua perda de biodiversidade, o que causa a diminuição da capacidade dos oceanos em absorver carbono (UNEP 2014; Nielsen *et al.*, 2020).

Outro ponto que deve ser ressaltado é a questão da geração e gerenciamento de resíduos sólidos. Anualmente é estimado que o Brasil desembolse mais de R\$10 bilhões na gestão de resíduos sólidos, sendo que 1/3 desses resíduos sólidos urbanos (RSU) são compostos por embalagens, e logo após a matéria orgânica os plásticos são os materiais de embalagem com têm a maior participação nos RSU coletados no país; com 13.5% (LANDIM, 2016)

Em suma, o mercado de embalagens alimentícias está saturado de plásticos baratos, originados do petróleo e de uso único e o setor é responsável por gerar uma grande poluição ambiental e uma parte considerável dos RSU no Brasil. O setor de embalagens produziu no ano de 2022 o valor de R\$123.2 bilhões, além de empregar 244.836 pessoas (ABRE, 2022). É uma parte da economia que gera lucros e empregos, mas que também gera grandes impactos ambientais. Visto as preocupações globais em minimizar os impactos ambientais das atividades humanas, emergem alternativas ao uso do plástico convencional em embalagens flexíveis. O desenvolvimento das embalagens acompanha os costumes das sociedades, assim a indústria de embalagens está constantemente em mudança; setores podem se tornar obsoletos e descobertas de materiais podem iniciar uma nova era.

2 OBJETIVO

Analisar as alternativas ao plástico convencional em embalagens flexíveis alimentícias a partir de um viés mais sustentável. As possibilidades foram avaliadas considerando matérias primas renováveis e/ou biodegradáveis, possibilidade de reciclagem e redução de impactos ambientais.

3 METODOLOGIA

Visto as problemáticas ambientais do uso de plásticos convencionais em embalagens flexíveis, é imprescindível a escolha de alternativas mais sustentáveis, ou seja, formas de atender as necessidades atuais sem comprometer o bem-estar das futuras gerações. Para a revisão bibliográfica deste presente trabalho foram analisados os prós e contras do uso de plástico em embalagens plásticas flexíveis, as características necessárias de embalagens flexíveis alimentícias e as possibilidades sustentáveis. As alternativas tiveram dois enfoques; materiais sustentáveis que substituam os polímeros não renováveis e não biodegradáveis e formas de minimizar os impactos quando ainda forem utilizados plásticos convencionais nas embalagens flexíveis por não ser possível uma substituição sustentável devida as suas propriedades fornecidas.

As informações foram obtidas utilizando plataformas online como Google Acadêmico, Scopus e Scielo, principalmente, através do uso das seguintes palavras-chave sozinhas ou combinadas (em português e inglês): “embalagens flexíveis alimentícias”, “biopolímeros”; “embalagens”; “sustentabilidade em embalagens”, “papel em embalagens”, “reciclagem de estruturas multicamadas” e “alternativas ao plástico”. Ademais, os dados estatísticos apresentados foram retirados de relatórios, em sites e informativos de associações como a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Abiplast) e do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL). Legislações como a Política Nacional dos Resíduos Sólidos e Resoluções da ANVISA também serviram de base para a pesquisa. Alguns livros foram alvos das pesquisas, como o elaborado pelo CETEA: “Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades”, o produzido pelo Instituto de Embalagens: “Embalagens papelcartão” e a 5ª edição do livro “Fundamentals of Packaging Technology” do Institute of Packaging Professionals.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Plásticos

Plásticos são polímeros orgânicos de alta massa molecular de origem renovável ou não cuja natureza do arranjo das suas cadeias poliméricas e a sua massa molar determinam as suas propriedades. O plástico é geralmente produzido por meio da nafta, que é obtida durante o refino do petróleo. Existem plásticos de monômeros únicos (homopolímeros) ou mais de um (copolímeros) e quimicamente podem ser termoplásticos. Os polímeros são divididos em inúmeras famílias, e as mais comuns são: poliésteres, poliamidas e poliolefinas. Dentro de suas cadeias, os átomos que formar um polímero são ligados por ligações primárias covalentes. Nos termoplásticos, as cadeias são ligadas umas às outras por meio de ligações secundárias do tipo Van der Waals. Nos termofixos, as ligações entre as cadeias são igualmente primárias covalentes. As ligações primárias são mais resistentes e formadas por um processo irreversível (reticulação), tornando impossível a reciclagem convencional (via fusão) de polímeros termofixos por se degradarem antes de fundir. Já os termoplásticos ao serem aquecidos se tornam líquidos, podendo ser remoldados e reciclados. Devido à essas propriedades, geralmente os termofixos servem de base na preparação de tintas, adesivos e vernizes das embalagens, enquanto os termoplásticos são empregados na estrutura da embalagem flexível (Sarantópoulos *et al.*, 2017; MANCINI, 2023).

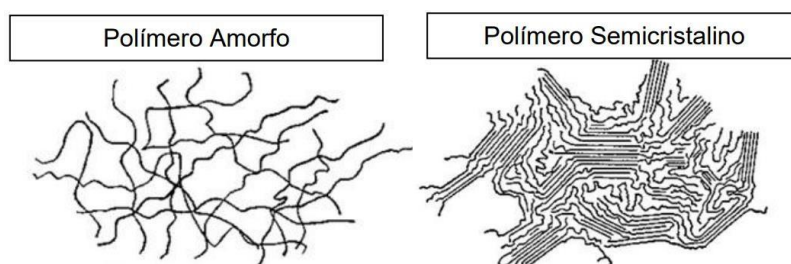
Quanto às cadeias, os polímeros podem ser classificados em lineares ou ramificados. Naturalmente os átomos em qualquer material tendem a se agrupar na forma mais empacotada possível já que este é o arranjo de menor energia. Estruturas lineares ou de ramificações mais curtas, ou seja, tendem a serem mais empacotadas, propiciando uma maior aproximação entre as moléculas e aumentando o grau de cristalinidade, empacotamento e densidade do polímero (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

Quanto mais ordenadas forem as moléculas de um termoplástico maior será a sua cristalinidade. Como as cadeias de polímeros são muito extensas na maioria das vezes é impossível que toda a sua estrutura seja alinhada e assim que ele seja cristalino como um todo, existindo diversas ilhas de regiões cristalinas (ordenadas - cristalitos) e regiões amorfas (desordenadas). Logo os polímeros não são considerados como cristalinos e sim como semicristalinos, e o grau de cristalinidade é definido como a quantidade de regiões cristalinas sobre a massa total de um polímero.

Existem alguns fatores que contribuem para esse grau, como por exemplo a velocidade de resfriamento que, quanto menor, maiores são as chances de formação de agregados cristalinos, isto porque existe um maior tempo para que estes se formem. Pigmentos e aditivos também podem atuar como agentes nucleantes, favorecendo a formação das regiões cristalinas (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

Os agregados cristalinos são maiores que a onda de luz visível, logo polímeros com regiões cristalinas são opacos. Já em polímeros desordenados/amorfos a luz atravessa sem obstáculos e o material é transparente. O grau de cristalinidade confere várias propriedades para o plástico, quanto maior o seu grau maior a sua densidade, rigidez, resistência à tração, temperatura de selagem (temperatura ideal para “grudar” duas faces), opacidade e resistência à compressão e menor a permeabilidade, blocking (adesão entre corpos), transparência, resistência ao rasgo e resistência ao impacto. Estas características são essenciais para embalagens alimentícias (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

Figura 1 – Polímero amorfo à esquerda e semicristalino à direita



Fonte: Sperling (2006).

4.2 Embalagem

Por definição, a embalagem é um recipiente ou pacote destinado para o acondicionamento de um produto garantindo a sua conservação e contribuindo com o manuseio dos alimentos com a sua distribuição para regiões longínquas da fabricação.

Alguns dos plásticos convencionais mais utilizados em embalagens flexíveis são PP, PEAD, PEBDL, PEBD, PET, PVC, OS, EVA, PA e PU (Abiplast, 2023). A fim de atender as especificações de um produto, combinações de materiais podem ser utilizadas na embalagem para somar propriedades a fim de melhorar os requisitos de conservação e proteção do alimento. Algumas das combinações mais comuns são: PEAD/EVA, PET/PE, BOPP/BOPP, PET/BOPP/PET (SARANTÓPULOS *et al.*, 2001).

4.3 Características essenciais da embalagem flexível alimentícia

Uma embalagem possui diversas funções, entre elas conservar o produto –no caso, alimento- em seu interior. Para que isso seja possível ela deve possuir uma barreira para evitar que o meio externo entre em contato com o alimento ou danifique-o (Sarantópoulos *et al.*, 2017). Outra função da embalagem é a de transporte, devendo atender condições de estocagem e distribuição do produto. Para isso a embalagem deve atender determinadas propriedades mecânicas, as quais também são essenciais durante o seu processo de fabricação nas indústrias até estarem presentes nas mãos dos consumidores. (Institute of Packaging Professionals, 2013).

4.3.1 Propriedades de barreira

A propriedade de barreira é a capacidade de proteção de uma embalagem flexível contra gases, luz, vapores, gordura, aromas, aditivos e solventes, já que estes podem alterar as propriedades de seu conteúdo reduzindo a sua vida útil (shelf-life ou prazo de validade). Logo o aumento da vida útil de uma embalagem facilita o acesso de alimentos em regiões remotas da origem de fabricação (BARLOW *et al.*, 2013)

As propriedades de barreira podem impedir ou dificultar a interação do meio interno com o meio externo. Em alimentos fritos e gordurosos, o oxigênio em contato com o interior da embalagem propicia a oxidação de lipídeos e provoca mudanças sensoriais como a rancificação. Já a permeação de gordura do interior da embalagem para o exterior pode prejudicar o seu visual. A luz acelera a oxidação que resulta entre outros fatores na perda de coloração, prejudicial em alimentos com pigmentos. O vapor d'água em contato com alimentos como salgadinhos pode levar a uma perda de crocância. No entanto, a retenção de umidade em alimentos com alta atividade de água, como queijos, é essencial para que não haja perda de massa. Logo, para cada produto as propriedades de barreira devem ser avaliadas considerando a constituição, aparência, sabor e duração necessária da embalagem. Existem variáveis que podem afetar o grau de permeabilidade de um material. Por exemplo, quanto maior o seu grau de cristalinidade, a espessura, a densidade, o tamanho das moléculas e polaridade menor a permeabilidade. Mas quanto maior a porosidade, maior a permeabilidade, já que os poros facilitam a permeação (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

Em materiais plásticos as formas mais comuns para aumentar as propriedades de barreira são: a adoção de estruturas multicamadas a fim de somar as

características de cada material (ROBERTSON, 2006), o uso de blendas de diferentes polímeros (CANEVAROLO, 2002) e a adição de revestimentos internos ou externos na embalagem, chamados de *coatings* (PETTERSEN *et al.*, 2004). Uma das formas de unir essas camadas é através de técnicas de processamentos relativamente comuns para a indústria de polímeros, como a laminação por adesivo ou por coextrusão. Geralmente a laminação é realizada com materiais que não podem ser extrusados, como por exemplos materiais poliméricos com não poliméricos. Ademais, tem se visto a possibilidade de utilizar polímeros adesivos que, além de exercerem o papel de junção, também possuem outras propriedades como de resistência química ou física (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

4.3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de um material plástico para embalagem flexível estão associadas com o seu desempenho mecânico no processo de fabricação nos fornecedores de filme base, nos equipamentos de conversão, nas máquinas de envase, nas condições ambientais de estocagem e de transporte até que cheguem ao consumidor final. Essas propriedades afetam a produtividade, os custos, as perdas e a segurança do processo. Algumas das propriedades mecânicas essenciais de um filme flexível alimentício são: resistência à tração, à delaminação, e à propagação do rasgo, bem como coeficiente de atrito, *blocking* e termossoldagem (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

A capacidade de resistência à tração indica a resistência de um material ao ser tracionado. O material da embalagem ao passar pelos cilindros das máquinas extrusoras, de revestimento, impressão e de empacotamento, por exemplo. É constantemente tracionado para que as embalagens fiquem rígidas e esticadas. Caso um material não suporte a tração ele pode romper nos cilindros, parando a produção e assim diminuindo a produtividade (Sarantópoulos *et al.*, 2017).

A resistência à delaminação avalia a facilidade de separação dos componentes de uma estrutura multicamadas, que podem ter sido produzidas por técnicas como a laminação por adesivo, revestimento ou extrusão. A delaminação pode ocorrer devido a falha no adesivo, temperaturas muito quentes durante a selagem ou muito frias como em freezers e a presença de gorduras e óleos e que comprometem a aparência, integridade, barreira e resistência mecânica das embalagens (American Society for Testing Materials, 2016). Já a resistência a propagação ao rasgo mensura a força

necessária para iniciar um rasgo e para propagá-lo. Problemas nessa propriedade comprometem a abertura correta, a integridade e a resistência mecânica geral da embalagem (American Society for Testing and Materials, 2002).

De acordo com a ASTM D1894-14 (American Society for Testing and Materials, 2014), o coeficiente de atrito é a força necessária para mover uma superfície sobre a outra, e é relacionado com a propriedade de deslizamento. Quanto menor o coeficiente de atrito de um material mais facilmente ele desliza contra uma superfície (por exemplo, do mesmo material). Já um alto valor pode acarretar na bloqueio/*blocking*, ou seja, a adesão entre corpos. Essa propriedade possui alta relevância em embalagens, pois geralmente envolve transporte em esteiras, especialmente durante o envase em formadores.

A termossoldagem é o processo de fechamento das embalagens que combina temperatura e pressão. O objetivo de uma boa termossoldagem é a integridade do sistema, evitando, assim como as propriedades de barreira, o contato do meio externo e interno. Logo essa vedação é um requisito para as embalagens, mas as vezes é necessário limitar a força da selagem para facilitar a sua abertura (American Society for Testing and Materials, 2009).

4.4 Sustentabilidade

A sustentabilidade é a forma que um sistema visa atender as necessidades das gerações atuais sem comprometer o bem-estar das futuras gerações, no que se refere a qualidade ambiental e das condições de vida. Segundo Schmidheiny (1996) o desenvolvimento econômico sem prejuízo a natureza é impossível, mas administrá-lo é possível. A fim de garantir esse bem-estar metodologias podem ser aplicadas como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) ou Custeio do Ciclo de Vida para avaliar impactos ambientais e econômicos de produtos e/ou serviços.

A ACV avalia os potenciais impactos ambientais causados por um produto ou processo durante o seu ciclo de vida, desde a extração de sua matéria prima até a sua disposição final (COLTRO, 2007). Tem como objetivo identificar as oportunidades de um processo para minimizar as consequências no meio ambiente e considera o uso dos recursos naturais, as suas implicações sobre a saúde humana e as consequências ecológicas (MATITSSON; SONESSON, 2003). Para a produção de embalagens plásticas flexíveis alimentícias pode-se considerar de modo simplista os

seguintes impactos: extração dos recursos naturais (petróleo, água, outras matérias-primas e energia); conversão do petróleo em nafta/polímero; transporte das resinas para os formadores de filme base; formação do filme; natureza das tintas de impressão, vernizes, pigmentos e aditivos adicionados ao filme; acondicionamento/envase do alimento; transporte do produto (embalagem + alimento); emissão de gases do efeito estufa (pelo transporte e exploração de matéria prima); geração de resíduo durante o processo e também pela embalagem pós-consumo e disposição final desses resíduos. Uma das principais formas de minimizar o impacto ambiental de qualquer sistema é diminuir o consumo de insumos, logo este presente trabalho terá como um dos enfoques indicar oportunidades aos recursos fósseis convencionais que minimizem esses impactos.

A ACCV mensura o custo do ciclo de vida de um produto considerando seus custos e benefícios econômicos e os seus impactos que geralmente são quantificados, mas não são contabilizados. Esses impactos são denominados de externalidades, ou seja, são efeitos colaterais positivos ou negativos em relação ao meio ambiente. Conforme Pigou (1920), uma externalidade negativa é um indício da ineficiência da alocação dos recursos naturais, e ao inserir as externalidades no cálculo econômico há a internalização das externalidades. As embalagens flexíveis alimentícias oriundas de plásticos convencionais, apesar de contribuírem com o aumento da vida útil do alimento e facilitarem o seu acesso em regiões longínquas da origem de fabricação, têm como impactos a exploração de recursos naturais e a geração de resíduos que muitas vezes não são precificados. O plástico convencional após o seu uso causa danos ao meio ambiente, devido a sua natureza não renovável e não biodegradável, comprometendo os seus serviços ecossistêmicos. Os serviços ecossistêmicos são os benefícios que os seres humanos obtêm dos ecossistemas (Avaliação do Milênio, 2005), como por exemplo a beleza cênica de uma praia e o sequestro de carbono feito pelos manguezais. Ademais, essa precificação dos impactos pode ser demonstrada a partir da poluição dos oceanos por plástico, que se estima que custa anualmente U\$2,5 trilhões de dólares (BEAUMONT *et al.*, 2019), ao afetar os seus serviços ecossistêmicos impedindo a produção de alimentos pelo mar, o seu uso como lazer e a provisão de oxigênio.

Uma importante ferramenta de gestão dos resíduos no país foi dada a partir da imposição da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe da seguinte ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução,

reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Portanto, a reciclagem é um processo indicado para os resíduos sólidos, mas só quando anteriormente a não geração, redução e reutilização não forem aplicáveis (BRASIL, 2010).

A reciclagem é uma das formas de minimizar as externalidades ambientais, ao reaproveitar os materiais de primeiro uso e contribuir para com a sustentabilidade ao diminuir a exploração dos recursos naturais. No Brasil, a reciclagem mecânica (a reciclagem baseada na fusão do plástico) é a principal opção para revalorizar e inserir o plástico novamente no ciclo as embalagens flexíveis alimentícias (Gonçalves, 2011).

Como embalagens plásticas flexíveis alimentícias geralmente são produzidas para uso único, considera-se que elas serão resíduos futuramente, se enquadrando nas premissas da PNRS (Abiplast, 2022). A não geração das embalagens flexíveis plásticas pode ser relacionada a: 1) um despertar na consciência sobre consumo excessivo, uma vez que os números das embalagens flexíveis alimentícias são gigantes (42% do total de embalagens produzidas em 2022 no Brasil – 910.14 toneladas (Abief, 2023)); e 2) à própria reciclagem, pois é possível utilizar resinas recicladas como matéria-prima, diminuindo assim a necessidade de resinas fósseis. Caso seja inviável a não geração, principalmente devido a falta do despertar sobre consumo na sociedade e da impossibilidade do uso de materiais reciclados em contato direto com o alimento (no caso de plásticos conforme legislação sanitária (ANVISA, 2008)), a redução deve ser priorizada.

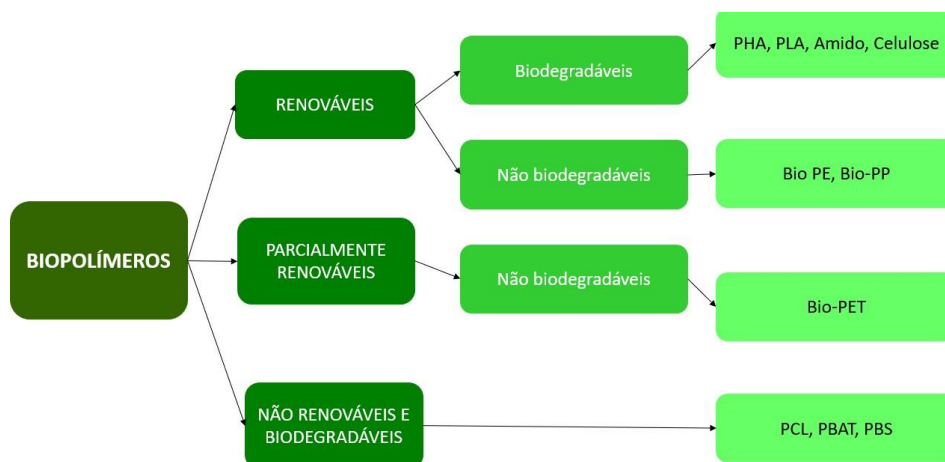
A logística reversa, também definida pela PNRS, é um instrumento dado por um conjunto de ações para viabilizar a coleta e o retorno dos resíduos ao ciclo produtivo do setor empresarial (BRASIL, 2010). Assim reaproveita-se esses produtos no mesmo processo ou em outros ciclos produtivos. A logística reversa é essencial na etapa de reciclagem, ao permitir por exemplo que os materiais reciclados pós consumo (PCR – post consumer recycled) retornem aos processos produtivos na forma de matéria-prima para as indústrias de higiene, cosméticos e limpeza doméstica; agroindústria; bebidas e construção (Abiplast, 2022). Segundo Coltro (2013), no Brasil existem alguns fatores que dificultam a logística reversa de embalagens plásticas e um deles é a falta do símbolo que identifica o tipo de polímero.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os recursos naturais geralmente utilizados em embalagens flexíveis alimentícias são oriundos de fontes não renováveis, que são finitas, e não degradáveis, ou seja, não são decompostos naturalmente a um tempo factível. Logo, biopolímeros se apresentam como uma alternativa, já que têm origem não esgotável e/ou são biodegradáveis. Os polímeros biodegradáveis são suscetíveis a degradação de microrganismos na presença de oxigênio gerando gás carbônico, metano e água, sofrendo paulatinamente deterioração de suas propriedades físico-químicas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008).

Os biopolímeros podem ser divididos em quatro grandes grupos; renováveis e biodegradáveis (os mais comuns são os polihidroxialcanoatos (PHA), poliácido láctico (PLA), amido e celulose); renováveis e não biodegradáveis (como o Bio-PE e Bio-PP); parcialmente renováveis e não biodegradáveis (Bio-PET) e não renováveis e biodegradáveis (como o policaprolactona (PCL), poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) e polibutileno succinato (PBS)). Biopolímeros não são necessariamente biodegradáveis nem polímeros biodegradáveis têm matéria prima renovável, sendo que a biodegradabilidade dos plásticos não depende da sua matéria prima e sim da composição do material produzido e do ambiente necessário para essa degradação (Sid *et al.*, 2021). Os biopolímeros chamados de *drop-in* são aqueles que são totalmente ou parcialmente de origem renovável e que não são considerados biodegradáveis, e apresentam propriedades muito similares aos materiais de origem fóssil (De Almeida *et al.*, 2014).

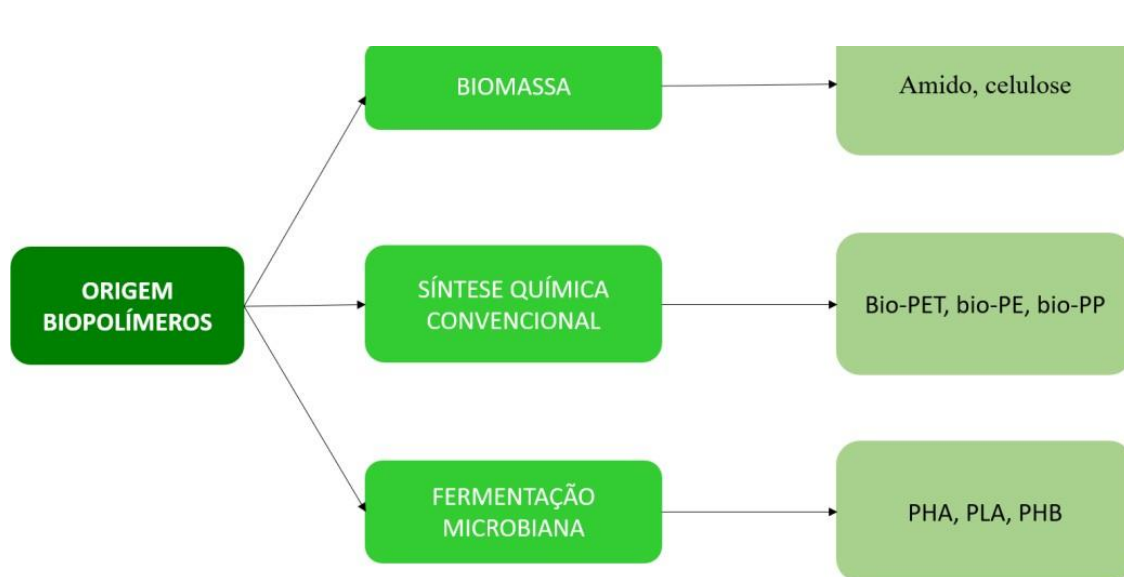
Figura 2 – Os quatro grandes grupos de biopolímeros quanto a sua origem e degradação.



Fonte: Autoria própria.

Quanto a sua origem os biopolímeros podem ser classificados em: de biomassa, síntese química convencional e por fermentação microbiana (Sarantópoulos *et al.*, 2017). Os biopolímeros produzidos por biomassa podem originar de polissacarídeos, proteínas animais ou vegetais e de lipídeos. São hidrofílicos e semicristalinos, não sendo opções viáveis para produtos úmidos ou que precisam de boa barreira ao vapor d'água. Para melhorar essa propriedade podem ser misturados com outros materiais mais hidrofóbicos (renováveis ou não) formando blendas, como o caso do amido/PCL e amido/ álcool polivinílico (PVOH). Os biopolímeros de síntese química convencional são tanto aqueles que possuem monômeros formados totalmente de fonte não renováveis, quanto aqueles que são parcialmente formados por fontes não renováveis e o resto por renováveis, como o bioPET. Já aqueles provenientes de fermentação microbiana são produzidos através da fermentação de açúcares ou de fontes de carbono de baixo custo como soro de leite, efluentes ricos em amido e de processadoras de azeitonas, como por exemplo os PHAs (poli(hidroxialcanoatos)) (ROBERTSON,2013).

Figura 3 – A origem dos biopolímeros



Fonte: Autoria própria.

5.1 Biopolímeros *drop-in*

Serão apresentados alguns exemplos de substituição com polímeros *drop-in*, de origem totalmente ou parcialmente renovável e não degradáveis. Essas alternativas minimizam a geração de resíduos sólidos de origem não renovável.

5.1.1 Bio-PP

O Bio-PP é um biopolímero em desenvolvimento obtido por fontes biológicas através da desidratação butileno do bio-isobutanol, oriundo da glicose, e da polimerização do propileno posteriormente. O PP é o segundo polímero mais utilizado mundialmente após o PE, portanto a sua substituição pelo Bio-PP geraria menos impactos ambientais (European Bioplastics, 2020). Esse biopolímero possui a vantagem de poder ser misturado com resíduos de PP convencional sem alterar as propriedades do material reciclado.

No entanto o Bio-PP, até o ano de 2021 ainda não existiam notícias de suas comercialização, já que ainda está em estágio de pesquisa em laboratórios e em testes em planta piloto devido as dificuldades de conversão e tecnologia dessa inovação. Se faz necessário portanto acelerar estas pesquisas para implementação do biopolímero no mercado (Sid *et al.*, 2021; Siracusa *et al.*, 2020).

5.1.2 *Bio-PET*

O PET convencional é um dos poliésteres mais utilizados mundialmente, e possui propriedades físicas e mecânicas propícias para aplicação em embalagens (Siracusa *et al.*, 2020). Apesar de ser reciclável, tem como origem fontes fósseis, contribuindo para impactos ambientais tais como a emissão dos GEE. Isto posto, uma alternativa mais sustentável é o Bio-PET, que possui as mesmas características que o PET convencional, inclusive o mesmo potencial de reciclabilidade, sendo constituído em cerca de 30% de monoetilenoglicol (MEG), derivado de culturas açucareiras e 70% de poliácido terfálico (PTA), de origem fóssil, e em (Bhunia *et al.*, 2013). A implementação do Bio-PET diminuiem 10% o uso de fontes fósseis e reduz em 25% na emissão de CO₂ na atmosfera (Robertson, 2012). No entanto, 70% de sua constituição ainda provém de fontes não renováveis, mas é reciclável. Devido a sua alta porcentagem de origem fóssil, atualmente existem esforços na criação de um Bio-PET 100% biológico (Volanti *et al.*, 2019).

5.1.3 *Bio-PE*

O PE é o polímero de maior relevância na produção anual de plásticos convencionais, representando 30% da produção anual (Kabasci, 2020), assim como no Brasil, onde a soma da produção de PEBD e PEAD em 2022 totalizou quase 80% (Abief, 2022). O PE é um polímero de origem fóssil e não biodegradável, logo a sua substituição por um material mais sustentável é importante, podendo o Bio-PE ser uma alternativa. O Bio-PE é um polietileno polimerizado de um etileno de 100% de base biológica, vindo, por exemplo, da cana-de-açúcar, beterraba ou grão de bico e possui as mesmas propriedades que o PE vindo do etileno de fontes fósseis, como excelente barreira a umidade. O Bio-PE é similar ao bio-PET mas possui toda a sua cadeia advinda de fontes renováveis e, apesar de não ser biodegradável, pode ser reprocessado após a reciclagem (até junto com o PE convencional), fechando o ciclo do material e diminuindo os impactos de e sua produção. O Bio-PE contribui na redução de emissão de GEE, uma vez que sequestra aproximadamente 2,5 toneladas de CO₂ por tonelada de produção (Kabasci, 2020). A sua produção já existia no Brasil na década de 60 e 70, mas devido ao preço baixo mais favorável do petróleo, a produção do Bio-PE foi descontinuada. Em 2010 a empresa brasileira Braskem começou a produzir o Bio-PE em escala comercial, no entanto os altos custos de produção limitam a sua disseminação, mas pode-se aproveitar e resgatar mais

intensamente a experiência prévia brasileira para disseminar o biopolímero no mercado. (Siracusa *et al.*, 2020)

Em suma os polímeros *drop-in* possuem a desvantagem de não serem biodegradáveis, mas caso forem de fato implementados podem constituir-se numa alternativa menos custosa em relação àqueles renováveis e degradáveis, que serão apresentados a seguir.

5.2 Biopolímeros renováveis e biodegradáveis

A seguir são apresentadas opções que englobam fontes renováveis e biodegradáveis. Essas alternativas geram menos impactos ambientais por não utilizarem materiais de origem fóssil e podem contribuir para a diminuição de geração de RS, conforme hierarquia da PNRS, caso os locais de destinação final favoreçam a biodegradação.

5.2.1 Amido

O amido é um polímero formado por moléculas de glicose do tipo amilose e amilopectina, e diferem quanto ao tipo de ligação que as une. Plásticos podem possuir sua origem do amido, o qual é de natureza renovável e biodegradável (E Moraes *et al.*, 2017). As principais fontes de amido são batatas, arroz, mandioca e milho, que possuam vantagem de serem largamente disponíveis, principalmente na África, Ásia e América do Sul. O amido é degradado em condições naturais em contato com oxigênio com uma taxa de degradação de 60% em 10 dias (Sid *et al.*, 2021).

A relação de concentração de amilose e amilopectina dos amidos define suas propriedades e suas aplicações comerciais. Em comparação aos plásticos de origem fóssil, os de origem do amido possuem fraca resistência mecânica e alta sensibilidade a umidade, mas que podem ser melhoradas com o uso de fibras de dendê, argilas e nanoceluloses (Ilyas *et al.*, 2018). Ou seja, o seu uso é viável, mas é necessário adicionar materiais que melhorem as suas propriedades. No geral, em embalagens alimentícias polímeros com base de amido são bons substitutos para poliestireno, oriundos do petróleo e que não são considerados como recicláveis devido a sua alta densidade (Sid *et al.*, 2021).

É possível que em indústrias alimentícias subprodutos alimentos ricos em amido (como cascas) sejam utilizados na fabricação de embalagens, contribuindo para fechar o ciclo de vida do produto e minimizando os seus impactos ambientais.

Ademais alimentosa base de amido além de serem baratos de se produzirem também são encontrados em abundância em regiões da África, Ásia e América do Sul, sendo alternativas para essas localidades (Sid *et al.*, 2021).

5.2.2 PLA

O poliácido láctico é um polímero transparente e compostável produzido pela fermentação microbiana do amido, produzindo o ácido láctico que é posteriormente polimerizado. As destinações ambientalmente mais corretas para resíduos de PLA são a compostagem e a digestão anaeróbia, devido à alta temperatura necessária para a sua degradação completa, haja vista as altas temperaturas transição vítrea (58°C) e de fusão (180°C). Outra destinação é a incineração com recuperação de energia, mas que não é exclusiva do PLA ou de biopolímeros, assim como de todos os plásticos convencionais. (Amass *et al.*, 1998). No entanto não são todas as nações que possuem usinas de compostagem e de incineração com recuperação de energia, e quando existem são custosas. O PLA é um material reciclável que possui a vantagem de praticamente manter as suas propriedades mecânicas após a reciclagem. Apesar de apresentar um custo maior em relação aos polímeros convencionais, a sua viabilidade de reprocessamento após a reciclagem é essencial para minimizar os custos e facilitar a sua disseminação no mercado (PEINADO *et al.*, 2015). Ademais a possibilidade de ser destinado a compostagem, incineradoras ou digestão anaeróbia contribuiu para diminuir os impactos ao fechar o seu ciclo de produção.

O PLA possui boa performance em suportar a dureza em alguns processos de fabricação de embalagem como a moldagem por injeção e sopro. No entanto, para outras técnicas não apresenta um bom desempenho, e assim como o amido, precisa ser reforçado com aditivos como nanofibras de celulose para assegurar propriedades de barreira ao vapor d'água ou ser utilizado na forma de PLA biorientado (Gan & Chow, 2018). Para melhorias mecânicas é possível revestir o filme com proteína isolada de soja (Dhall & Allam, 2020, pp. 26-43), ou adicionar caulinitas, amidos e plastificantes sustentáveis. A fim de aprimorar a barreira a oxigênio ainda é possível revestir o PLA com policaprolactona biodegradável (PCL), por possuir baixa permeabilidade, mas ainda assim possui uma menor permeabilidade ao O₂ que o PS, porém maior que o PET (Iotti *et al.*, 2009)

Portanto, o PLA se apresenta como um dos biopolímeros mais promissores devido a sua avançada produção industrial, pela empresa Natural Works por exemplo,

e disseminação no mercado, já presente no Brasil em algumas empresas como a GreenLiving Brasil, além de ser um bom substituto para PS, PEBD, PEAD e PET, além de liberar 60% menos CO₂ que o PS e o PET (Vink & Davies, 2015).

5.2.3 PHA (Polihidroxicanoatos)

Os polihidroxicanoatos (PHA) são estruturas que funcionam como reservas de energia de microrganismos (como *Cupriavidus necator*, *Bacillus megaterium*, *Alcaligenes eutrophus*), e são produzidos a partir da fermentação de uma fonte de carbono e quando há limitação de elementos como O₂ ou N₂ causando um estresse fisiológico (Sid *et al.*, 2021; CAMPOS, 2016). Os polímeros PHA são biodegradáveis em ambientes aeróbicos e anaeróbicos, o que possibilita a sua destinação tanto para usinas de compostagem quanto para aterros sanitários, locais mais comuns de envio de resíduos no Brasil (Bugnicourt *et al.* 2014). Ademais conforme Fletcher (1993) os PHAs degradam 85% de sua biomassa no período de 7 semanas.

O PHA possui três variações quanto as suas propriedades, o PHA puro, o polihidroxibutirato (PHB) e o 3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato (PHBV). Quando a glicose for a fonte para os microrganismos o processo de fermentação a condições restritas produz o PHB, e quando é adicionado o ácido propiônico nessas condições o PHBV é produzido (Theobald *et al.*, 2019). O PHB possui propriedades de barreira ao oxigênio melhores que PET e PP, e boas barreiras de odor e à gordura para fins alimentícios, já o PHBV possui propriedades mecânicas similares ao do PP e do PEBD, bem como boa barreira a umidade, oxigênio e aromas (Sid *et al.*, 2021).

O custo de produção do PHA é cerca de 20-80% a mais alto em relação aos plásticos convencionais devido às técnicas específicas de produção, o que restringe a sua produção em larga escala (Zhao *et al.*, 2020). Esse biopolímero possui baixa permeabilidade ao vapor d'água (valores comparáveis ao PEBD) e tem boas propriedades termomecânicas (similar ao PP e PE) e é frequentemente combinado com o PLA para conferir melhores características físicas, mecânicas e térmicas em comparação com o PLA puro. (Sid *et al.*, 2021)

Dessa forma os PHAs podem ser substitutos de PP, PE, PET. PEBD, além de ser viável a sua combinação com o PLA. No entanto seu alto custo, em torno de 20 a 80% maior que a produção de plásticos convencionais, limita a sua disseminação no mercado (Zhao *et al.*, 2020).

5.2.4 Celulose

A celulose ($C_6H_{10}O_5$) é um polímero formado por monômeros presentes nas paredes celulares das plantas e é a principal matéria prima para a fabricação de papel. O papel tem boa resistência mecânica e boa superfície para impressão, hidrofílico e poroso, e, portanto, naturalmente permeável a gases, umidade e gordura. Logo em embalagens alimentícias primárias o papel é utilizado em conjunto com revestimentos, como polímeros (filmes, filmes metalizados), alumínio, ceras, parafinas e vernizes (como o copolímero de etileno e álcool vinílico (EVOH)) para melhorar as suas propriedades mecânicas, como de selagem e de barreira (a umidade, gases e gordura).

Ademais, o papel é renovável, biodegradável (leva em torno de 6 meses para degradar) e segundo a ANVISA os materiais celulósicos são um dos poucos que ao serem reciclados, e se atenderem a lista positiva da RDC nº88/2016, podem entrar em contato direto com os alimentos ou seja podem retornar na forma de embalagem primária (ANVISA, 2016). Logo a adoção do papel nessas embalagens melhora a gestão dos resíduos sólidos ao contribuir para o fechamento do ciclo de vida dos produtos que o utilizam. No entanto essa reciclabilidade considera o papel sozinho, e quando laminado com outros materiais deve ocorrer a sua separação, bem como a remoção dos vernizes e outros produtos utilizados para diminuir sua permeabilidade. Se não for possível a separação a reciclagem pode ser comprometida, assim como o tempo de degradação pode ser aumentado. Além dos materiais celulósicos, PET-PCR, vidro, cerâmica e metais são os únicos materiais que são autorizados para entrarem em contato direto com o alimento, caso se enquadrem nas suas respectivas legislações pertinentes (ANVISA, 2020). O vidro e a cerâmica não são aplicáveis para embalagens flexíveis alimentícias e o PET-PCR será tema do próximo tópico.

Porém, há uma preocupação ambiental quanto à cadeia de produção do papel, originada de monoculturas de eucalipto ou pinus, espécies exóticas no Brasil. Ainda, outras preocupações são o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa da cadeia de produção. Ao realizar uma ACV desse ciclo produtivo é possível identificar outros impactos ambientais, no entanto o papel continua como fonte renovável e biodegradável em relação ao plástico convencional (NETTO, 2013). Outrossim, a própria produção de papel a partir das fibras recicladas contribui na

diminuição da poluição ambiental, já que a cada tonelada de papel reciclado, vinte e duas árvores deixam de ser cortadas (Medeiros *et al.*, 2018)

O Brasil é um grande produtor de papel, e a celulose é considerada um ativo na economia brasileira por fazer parte do PIB do país, contribuindo com 1,2% no ano de 2019 (Klabin, 2023). Portanto existe uma oportunidade de crescimento na utilização do papel como embalagem flexível alimentícia. E, para minimizar os impactos de sua cadeia produtiva, podem ser consideradas a adoção de sistemas agroflorestais, modelos de plantação árvores em consórcio com a produção agrícola e animal atrelada a melhorias ambientais, no lugar de monoculturas e a posterior reciclagem do papel (De Macedo, 2013). Ademais devido a intensificação da comunicação de forma eletrônica, é possível as fábricas de celulose antes voltadas para esses produtos de comunicação voltarem a sua produção para embalagens flexíveis em a necessidade de grandes investimentos para a criação de novas indústrias.

Em suma essas alternativas dos itens 5.1 e 5.2 utilizam de fontes parcialmente ou totalmente renováveis, diminuindo os impactos ambientais, mas necessitam de destinações corretas que propiciem a sua biodegradação.

5.3 Biopolímero de origem fóssil e biodegradável – PBAT

Este tópico sugere uma alternativa que ainda não é renovável, mas que possui vantagem de sustentabilidade em relação aos plásticos convencionais, por ser biodegradável. O poli(butileno adipato co-tereftalato) é um polímero biodegradável e que se for destinado em condições que favoreçam a sua degradação pode contribuir com a diminuição de materiais não biodegradáveis.

O PBAT é um polímero biodegradável, obtido da síntese de derivados do petróleo, mais precisamente da reação de policondensação do butanodiol, ácido adípico e ácido tereftálico. Sua principal característica é ser compostável, e possui uma taxa de biodegradação de em 45 dias ser em torno de 80%, taxa muito similar com a celulose (Jian *et al.*, 2021).

O PBAT apresenta propriedades mecânicas similares à dos filmes de PEBD, no entanto não possui baixa permeabilidade ao vapor de água como o polietileno de baixa densidade. O seu uso em embalagens monocamadas não é factível, devido à ausência de todas as propriedades mecânicas, essenciais a embalagens flexíveis e que são oferecidas pelos plásticos convencionais. Assim é possível a utilização de

estruturas multicamadas para melhorar as propriedades da embalagem, através da adição de materiais de baixo custo como amido, que traz um teor biodegradável, mas que aumenta a barreira a umidade; ou de reforços como o PLA (Jian *et al.*, 2021). Apesar de ser um material custoso, já está em comercialização mundialmente por diversas empresas como a BASF, Novamont, BIOTECH e KINGFA (E Moraes *et al.*, 2017).

Logo existem diversas alternativas ao plástico convencional, mas o maior desafio em introduzir e colocar em práticas essas fontes biológicas é combinar a sua durabilidade com o *shelf-life* do produto que está embalado (Sid *et al.*, 2021).

5.4 PCR

Post consumer recycled (PCR) ou reciclados pós consumo são resultados de produtos utilizados no cotidiano dos consumidores feitos de plásticos, que, ao serem reciclados, dão origem a resinas a serem utilizadas em novos itens. Esses materiais são compatíveis com a não geração, redução, reutilização e reciclagem dos resíduos sólidos conforme a hierarquia da PNRS, ao minimizar a exploração de novos recursos naturais utilizando materiais já existentes (BRASIL, 2010).

Alguns insumos para embalagens como aço, vidro e alumínio PCR são autorizados pela ANVISA para o contato direto com alimentos, já que quando reciclados quimicamente são submetidos a temperaturas de fusão superiores a 500°C, o que possibilita a degradação de potenciais compostos nocivos à saúde humana. Os polímeros, no entanto, quando reciclados não atingem temperaturas tão elevadas, e, portanto, esse processo pode não ser o suficiente para degradar todos os contaminantes, sejam elas oriundas das próprias substâncias, do processo de reciclagem ou do ambiente de descarte.

Porém, o órgão regulamentador autoriza o uso de alguns processos de reciclagem de PETe sua resina PET-PCR para o contato direto com alimentos, uma vez que o material é submetido a uma rigorosa descontaminação (ANVISA, 2008).

Apesar de existir apenas um tipo de material plástico pós consumo autorizado para ser embalagem primária no Brasil, isso não impede que os resíduos das embalagens flexíveis de plástico convencional possam ser utilizados para outros fins, para as indústrias de higiene, cosméticos e limpeza doméstica; agroindústria; bebidas e construção (Abiplast, 2022).

Ademais, o uso de PCR pode ser inserido como embalagem secundária ou terciária, na forma de *multipacks* ao unir diversas primárias ou secundárias. A depender do tipo de reciclagem as resinas PCR também possuem o benefício de permanecerem com propriedades bem próximas às do polímero inicial, como as características mecânicas e de barreira.

Conforme pesquisa feita pela Abiplast (2022), do total de resíduos reciclados no ano de 2021, 67.4% são respectivos a materiais de uso único, que englobam entre outras embalagens as flexíveis, totalizando 376.262 toneladas. Portanto existe uma oportunidade em utilizar esse montante como resinas recicladas pós consumo. Ademais, observa-se uma tendência de aumento no uso de resinas recicladas uma vez que, em 2022, das 2.167 mil toneladas de embalagens plásticas flexíveis produzidas, 114 mil toneladas foram de materiais reciclados. Isso representou apenas 5,2% do total, mas houve um de 9% em relação ao ano anterior (Abief, 2023).

Logo restam ao mesmo tempo novas regularizações de mais polímeros PCR destinados à embalagens primárias por parte da Anvisa e desenvolvimento por parte das empresas de novas tecnologias que assegurem a segurança sanitária de materiais reciclado em contato direto com alimentos. Com isso poderá haver uma posterior adequação do mercado a fim de disseminar materiais PCR e reduzir o consumo de resinas fósseis de material virgem.

5.5 Alternativas sustentáveis combinadas com plástico convencional

Apesar de existirem alternativas que possam substituir o plástico convencional em embalagens flexíveis alimentícias como as citadas nos itens 5.1 a 5.4, muitas vezes os polímeros convencionais, não renováveis e não biodegradáveis, ainda serão utilizados nas estruturas de embalagens flexíveis alimentícias, devido as suas propriedades oferecidas. Nesses casos existem outras formas de seu uso gerar menos impactos ambientais.

A fim de atender as especificações de um produto, combinações de materiais podem ser utilizadas na embalagem para somar propriedades. No entanto, o arranjo pode dificultar a reciclagem pela incompatibilidade dos materiais, devido à incompatibilidade físico-química que envolver a dificuldade em separar as camadas e incompatibilidade térmica para a reciclagem (Bauer *et al.*, 2021). Logo, redesenhar as estruturas multicamadas ao combinar materiais compatíveis é uma alternativa para facilitar a reciclagem. Uma vez que as poliolefinas atualmente dominam o setor de

embalagens flexíveis, evitar o uso de PET, poliamidas ou quaisquer outros polímeros que não sejam compatíveis com a reciclagem de poliolefinas, pode ser uma opção. Ou utilizar em estruturas multicamadas, polímeros da mesma família (poliéster com poliéster, poliolefinas com poliolefinas) (Beaumont *et al.*, 2019). Existe também a possibilidade do uso de compatibilizantes, como anidrido maleico e o metacrilato de glicidil, mas que geralmente são custosos. Algumas sugestões de combinações de materiais junto a monocamadas de poliolefinas para aumentar as propriedades de barreira são óxido de silício ou óxido de alumínio, EVOH e metalização, mas que, como já mencionado, costumam dificultar processos de reciclagem posteriores (Bauer *et al.*, 2021).

Todavia, conforme Barlow *et al.* (2013) optar por materiais recicláveis em embalagens plásticas talvez não seja a alternativa mais sustentável, mas sim a diminuição da quantidade de insumos na embalagem desde que mantidas as propriedades mecânicas de barreira. Um exemplo dessa alternativa é a redução de espessura dos filmes e a diminuição do dimensional das embalagens.

6 CONCLUSÃO

Para o presente trabalho foram consideradas como alternativas sustentáveis aquelas que facilitassem a não geração, redução e reciclagem dos plásticos convencionais ou minimizassem os impactos ambientais. Parte do direcionamento foi baseado na ordem de prioridade instituída pela PNRS: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final adequada ambientalmente para rejeitos. Uma vez que a não geração de insumos para as embalagens é inviável devido a demanda do mercado e que o uso de resina reciclada só é autorizado no contato com alimentos para o PET, necessitando de um desenvolvimento técnico relativamente grande por parte do setor empresarial e aprovação governamental, a prioridade inicial passa a ser a redução de resinas plásticas convencionais.

Logo, alternativas ao plástico convencional podem ser matérias-primas que sejam de fontes renováveis e/ou biodegradáveis. Isto porque a maior parte das embalagens flexíveis alimentícias é de uso único e possivelmente serão descartadas pelo consumidor após o consumo e dificilmente serão reinseridos na cadeia produtiva com a mesma finalidade. Como exemplos de alternativas foram apresentados os biopolímeros, polímeros que têm origem não esgotável e/ou são biodegradáveis; bio-PP, bio-PET, bio-PE, amido, PLA, PHA, celulose. Ademais o PBAT também foi explorado pois apesar de ser oriundo de fonte fóssil se apresenta como biodegradável.

A seguir foram resumidos todos os dados da pesquisa desse trabalho para as alternativas de substituição aos plásticos convencionais.

Quadro 1 – Resultado das alternativas indicadas ao longo do trabalho

Alternativa	Renovável	Biodegradável	Reciclável	Compostável	Custoso	Mercado	Prós	Substituição	Contras
Bio-PP	SIM	NÃO	SIM	NÃO	-	ainda não é comercializado	propriedades iguais ao PP	PP	está em fase de pesquisas, não disponível no mercado
Bio-PET	parcialmente	NÃO	SIM	NÃO	-	já é utilizado	propriedades iguais ao PET	PET	ainda não tem origem 100% renovável
Bio-PE	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	já é utilizado (Braskem)	excelente barreira e umidade, propriedades iguais ao PE	PE	não é biodegradável

Amido	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	já é utilizado	Abundante e contribuir para fechar ciclos de produção	PS	sozinho tem baixa resistência mecânica e sensibilidade a umidade
PLA	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	amplamente utilizado	mantem propriedades após a reciclagem	PS, PEBD, PEAD, PET	necessita de reforço com aditivos para assegurar propriedades de barreira.
PHA	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	já é utilizado, mas não em escala industrial	rápida degradação, boas barreiras a O ₂ umidade, odor e gordura	PET, PP, PEBD	técnicas muito específicas de produção
Celulose	SIM	SIM	SIM	SIM	-	já é utilizado	oportunidade de crescimento nacional	-	necessita de reforço para assegurar propriedades de barreira.
PBAT	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	já é utilizado (BASF, Biotech)	é biodegradável e possui boa resistência mecânica	PEBD	necessita de reforço para assegurar propriedades de barreira.
PCR	depende da fonte	depende da fonte	SIM	NÃO	SIM	é utilizado para outros fins sem ser alimentício (exceção PET)	reduz a quantidade de resíduos de plástico convencional	-	carência de mais materiais para contato direto com alimento

Fonte: Autoria própria.

No caso de não serem biodegradáveis a reutilização desses materiais é possível para outros fins para além dos alimentícios citados anteriormente, na forma de materiais PCR para as indústrias de higiene, cosméticos e limpeza doméstica; agroindústria; bebidas e construção (Abiplast, 2022). Também pode-se optar por reduzir a quantidade de insumos na estrutura dessas embalagens sempre que possível, considerando todas as variáveis do produto (produção do filme, *shelf-life*, acondicionamento, venda, logística) através da embalagem e redução de espessura e dimensional minimizando a quantidade de resina utilizada. As camadas presentes na estrutura também podem sofrer alterações para se tornarem mais sustentáveis, como por exemplo a adoção de estruturas monocamadas no lugar de multicamadas a depender do material, facilitando a posterior triagem na reciclagem. Em último caso, se ainda for optado a utilização de plásticos convencionais devido as suas propriedades oferecidas, é preferível utilizar camadas de polímeros da mesma família, facilitando futuramente o processo de reciclagem

REFERÊNCIAS

ABIEF. Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis. **Pesquisa trimestral**. Maxquim.

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **PERFIL 2022**.

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Produção de plásticos reciclados pós-consumo cresce 14,3% no Brasil**. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/noticias/producao-de-plasticos-reciclados-pos-consumo-cresce-143-no-brasil/>>. Acessado em: 01 de outubro de 2023

ABRE. Associação Brasileira de Embalagem. **Estudo ABRE Macroeconômico da Embalagem e a Cadeia de Consumo, 2023**. 2023

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. 2022

AMASS, Wendy; AMASS, Allan; TIGHE, Brian. **A review of biodegradable polymers: uses, current developments in the synthesis and characterization of biodegradable polyesters, blends of biodegradable polymers and recent advances in biodegradation studies**. Polymer international, v. 47, n. 2, p. 89-144, 1998.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Perguntas & Respostas. Materiais em contato com Alimentos**. 5ª Edição. Brasília, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/alimentos/perguntas-e-respostas-arquivos/embalagens-materiais-em-contato-com-alimentos.pdf>>. Acessado em: 12 de outubro de 2023

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1894-14**. standard test method for static and kinetic coefficients of friction of plastic film and sheeting. West Conshohocken, PA: ASTM, 2014

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1938 – 2**. standard test method for tear-propagation resistance (trouser tear) of plastic film and thin sheeting by a single-tear method. West Conshohocken, PA: ASTM, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **F88/F88M – 09**: standart test method for seal strength of flexible barrier materials. West Conshohocken, PA: ASTM, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **F904 – 16**; standart test method for comparison of bond strength or ply adhesion of similar laminates made from flexible materials. West Conshohocken, PA: ASTM, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15448-2**: embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis: parte 2: biodegradação e compostagem: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

BARLOW, C. Y.; MORGAN, D. C. **Polymer film packaging for food: An environmental assessment.** Resources, Conservation and Recycling, v. 78, p. 74-80, 2013.

BAUER, Anna-Sophia *et al.* **Recyclability and redesign challenges in multilayer flexible food packaging—A review.** Foods, v. 10, n. 11, p. 2702, 2021.

BEAUMONT, Nicola J. *et al.* **Global ecological, social and economic impacts of marine plastic.** Marine pollution bulletin, v. 142, p. 189-195, 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº88, de 29 de junho de 2016. Aprova o regulamento técnico sobre materiais, embalagens e equipamentos celulósicos destinados a entrar em contato com alimentos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº20, de 26 de março de 2008. Dispõe sobre o Regulamento Técnico sobre embalagens de polietilenotereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2008.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº727, de 1º de julho de 2022. Dispõe sobre a rotulagem dos alimentos embalados. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2022.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos; altera a Lei nº9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010.

BUGNICOURT, Elodie *et al.* **Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging.** 2014.

CAMPOS, Márcio Inomata. **Polihidroxicanoatos (PHAs) obtidos a partir da glicerina bruta residual do biodiesel (GBRB): produção, otimização, cinética e propriedade.** 2016

COLTRO, Leda *et al.* **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão.** Campinas: Cetea/Ital, v. 1, 2007.

COLTRO, Leda; DUARTE, Leda C. **Reciclagem de embalagens plásticas flexíveis: contribuição da identificação correta.** Polímeros, v. 23, p. 128-134, 2013.

DE ALMEIDA OROSKI, Fabio; CHAVES ALVES, Flávia; BOMTEMPO, José Vitor. **Bioplastics tipping point: drop-in or non-drop-in?** Journal of Business Chemistry, v. 11, n. 1, 2014.

DE MACEDO, J. L. V. **Sistemas agroflorestais: princípios básicos.** 2013.

E MORAES, Allan Robledo Fialho *et al.* **Starch, cellulose acetate and polyester biodegradable sheets: Effect of composition and processing conditions.** Materials Science and Engineering: C, v. 78, p. 932-941, 2017.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org/?s=bio-pp>. Acesso em: <10 de novembro de 2023>

FLETCHER, A.; **Plastics from bacteria: PHA as Natural, Biodegradable Polyesters**, Springer Verlag: New York, 1993.

GAN, Ivy; CHOW, W. S. **Antimicrobial poly (lactic acid)/cellulose bionanocomposite for food packaging application: A review.** Food packaging and shelf life, v. 17, p. 150- 161, 2018.

GONÇALVES, Oldair Luiz. **A Reciclagem como Meio de Correção das Externalidades: Ambientais e Sociais.** VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2011.

ILYAS, R. A. *et al.* **Characterization of sugar palm nanocellulose and its potential for reinforcement with a starch-based composite. In: Sugar palm biofibers, biopolymers, and biocomposites.** CRC Press, 2018. p. 189-220.

Instituto de Embalagens. **Embalagens papelcartão** Institute of Packaging Professionals

IOTTI, Marco *et al.* **Organic–inorganic hybrid coatings for the modification of barrier properties of poly (lactic acid) films for food packaging applications.** Journal of Polymers and the Environment, v. 17, p. 10-19, 2009.

JIAN, Jiao; XIANGBIN, Zeng; XIANBO, Huang. **An overview on synthesis, properties and applications of poly (butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT.** Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, v. 3, n. 1, p. 19-26, 2020.

KABASCI, Stephan. **Biobased plastics** – Chapter 4. Editor(s): Trevor M. Letcher, Plastic Waste and Recycling, Academic Press, 2020, Pages 67-96, ISBN 9780128178805

KLABIN. Como o Brasil se tornou o líder em celulose no mundo. 2023. Disponível em: <[https://blog.klabin.com.br/-/brasil-lider-em-celulose-no-mundo#:~:text=Qual%C3%A9%20a%20import%C3%A2ncia%20do,Bruto%20\(P%20do%20pa%C3%ADs](https://blog.klabin.com.br/-/brasil-lider-em-celulose-no-mundo#:~:text=Qual%C3%A9%20a%20import%C3%A2ncia%20do,Bruto%20(P%20do%20pa%C3%ADs)>. Acessado em: 5 de novembro de 2023.

LANDIM, Ana Paula Miguel *et al.* **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil.** Polímeros, v. 26, p. 82-92, 2016.

MANCINI, Sandro Donnini. **Materiais e Reciclagem.** 10 – Polímeros. Sorocaba, Setembro de 2023. UNESP. Disponível em: <<https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbienta/SandroD.Mancini/10---polimeros.pdf>>. Acessado em: 23 de novembro de 2023.

MATTSSON, Berit; SONESSON, Ulf (Ed.). **Environmentally-friendly food processing.** Woodhead publishing, 2003.

MEDEIROS, Flaviani Souto Bolzan *et al.* **Modelagem computacional para avaliação de cenários sobre a reciclagem de papel em uma Instituição de Ensino Superior.** Revista Gestão & Tecnologia, v. 18, n. 3, p. 130-151, 2018.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **AVALIAÇÃO DO MILÊNIO.** 2005.

NETTO, Clovis Alvarenga; NETO, João Amato. **Relatório ACV.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Produção. 2013

NIELSEN, Tobias D. *et al.* **Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, v. 9, n. 1, p. e360, 2020.

PEINADO, V.; CASTELL, P.; GARCIA, L.; FERNANDEZ, A. **Effect of extrusion on the mechanical and rheological properties of reinforced poly(lactic acid): reprocessing and recycling of biobased materials.** Materials, v. 8, p. 7106-7117, 2015.

ROBERTSON G. L. (2012). **Food packaging: Principles and practice** (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, L. M. de; PÁDULA, M.; COLTRO, L.; ALVES, R. M. V.; GARCIA, E. E. C.. **Embalagens Plásticas Flexíveis: Principais Polímeros e Avaliação das Propriedades.** CETEA / ITAL, Campinas. 2017.

SCHMIDHEINY, Stephan; BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cambiando el rumbo: una perspectiva global del empresariado para el desarrollo y el medio ambiente.** México: Fondo de Cultura Económica, 1992.

SID, Saurabh *et al.* **Bio-sourced polymers as alternatives to conventional food packaging materials: A review.** Trends in Food Science & Technology, v. 115, p. 87-104, 2021.

SIRACUSA, Valentina; BLANCO, Ignazio. **Bio-polyethylene (Bio-PE), Bio-polypropylene (Bio-PP) and Bio-poly (ethylene terephthalate)(Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications.** Polymers, v. 12, n. 8, p. 1641, 2020.

SPERLING, L. **Introduction to physical polymer science.** 4^a. ed. Estados Unidos: Wiley, 2006.

THEOBALD, Michele *et al.* **Influência do uso de plastificante e nanopartículas de argila em filmes de poli (hidroxibutirato-co-hidroxivalerato)(PHBV) sob diferentes condições ambientais.** 2019.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Valuing plastics: The business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry.** Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. 2014.

VINK, Erwin TH; DAVIES, Steve. **Life cycle inventory and impact assessment data for 2014 Ingeo™ polylactide production**. Industrial Biotechnology, v. 11, n. 3, p. 167-180, 2015.

YUGUE, Eduardo Tadashi. **Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil**. Artigo, 2020.

ZHAO, Xiaoying; CORNISH, Katrina; VODOVOTZ, Yael. **Narrowing the gap for bioplastic use in food packaging: an update**. Environmental science & technology, v. 54, n. 8, p. 4712-4732, 2020.